

OULUN SEUDUN  
AMMATTIKORKEAKOULU



Juha Juuti

## LIIKEMÄÄRÄAVUSTEINEN RADIOPAIKANNUS

# LIKEMÄÄRÄAVUSTEINEN RADIOPAIKANNUS

Juha Juuti  
2010  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Koulutusohjelma Tietotekniikka	Projekti Insinöörityö	Sivuja 51	+	Liitteitä 0
Suuntautumisvaihtoehto Langaton tietoliikenne	Aika 2010		+	
Työn tilaaja Vinski Bräysy, ICDNET-hanke	Työn tekijä Juha Juuti			
Työn nimi Liikemääräavusteinen radiopaikannus				
Asiasanat Radiopaikannus, kiihtyvyysanturi, liikemäärä, WSN, sensoriverkko				

Insinöörityössä suunniteltiin liikemääräavusteinen radiopaikannusjärjestelmä, joka perustuu lyhyen kantaman sensoriverkkoon. Radiopaikannus suunniteltiin toteutettavaksi IEEE 802.15.4 -pohjaisella lyhyen kantaman radioverkolla, jossa käytetään signaalin kulkuaikaan perustuvia paikannusalgoritmeja. Kiihtyvyysanturin mittaustuloksia käytetään paikannuksessa, jotta saadaan parempi paikannustarkkuus, pienempi virrankulutus ja parempi häiriönsieto verrattuna pelkkään radiopaikannukseen. Laitteistona käytettiin JN5148-piiriin perustuvaa kehitysympäristöä, jonka on valmistanut Jennic Ltd.

Insinöörityössä kehitettyä paikannusjärjestelmää voidaan käyttää esimerkiksi jalkapallojoukkueen valmennuksessa pelaajien liikkeiden seurantaan. Tässä työssä keskityttiin yhden pelaajan paikantamiseen. Laitteiden radioyhteyksien kantamat ovat riittävät jalkapallokentän kokoisella alueella.

## ALKULAUSE

Tämä työ on tehty Oulun seudun ammattikorkeakoulun tietotekniikan osastolla ICDNET-hankkeessa osana laajempaa tutkimusta, jossa on tarkoitus tutkia WSN-teknologian mahdollisia sovelluksia, kuten esimerkiksi paikannusta. Tavoitteena on ollut kehittää liikemääräavusteinen radiopaikannusjärjestelmä, joka pohjautuu Jennic JN5148 -kehityspakettiin ja jolla voi paikantaa jalkapalloilijaa pelikentällä.

Esitän kiitokset työn tilaajalle ja ICDNET-hankkeen vetäjälle Vinski Bräysylle hyvistä neuvoista ja rennon ilmapiirin luomisesta työn tekemisen aikana. Työn valvojalle lehtori Kari Jyrkälle kiitokset työn valvomisesta. Lehtori Tuula Hopeavuorelle kiitokset tekstinohjauksesta. Koko tietotekniikan osastoa haluan kiittää hyvästä opetuksesta ja kannustuksesta opiskelujen varrella. Kiitokset insinööri Teemu Savikoskelle kannustuksesta ja yhteistyöstä. Hän teki samanaikaisesti lopputyötään TOF-etäisyysmittauksista. Erityiskiitokset ovat ansainneet vaimoni ja poikani, jotka ovat jaksaneet olla ymmärtäväisiä ja kannustavia opiskelujeni aikana ja tuoneet suuret määrät iloa elämäni.

Oulussa 10.10.2010

Juha Juuti

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	3
ALKULAUSE.....	4
SISÄLTÖ.....	5
LYHENNELUETTELO .....	7
1 JOHDANTO .....	9
2 WSN-PAIKANNUS .....	10
2.1 Paikannusjärjestelmän kuvaus.....	10
2.2 IEEE 802.15.4 -standardi .....	12
2.3 WPAN-radioverkon topologiat .....	13
3 JENNIC-LAITTEISTO .....	17
3.1 Ohjelmiston kehitysympäristö.....	18
3.2 Virrankulutus .....	18
3.3 RISC-prosessori.....	19
3.4 Jennic 5148 -radiomoduuli .....	19
4 RADIOPAIKANNUS.....	21
4.1 Etäisyysmittaukset radiosignaalin avulla .....	21
4.2 TOF-mekanismi.....	22
4.2.1 Mittausnopeus .....	24
4.2.2 Mitattava etäisyys TOF-menetelmällä.....	25
4.2.3 Häiriöt TOF-mittauksissa .....	26
5 KIIHTYVYYSANTURI PAIKANNUKSESSA.....	29
5.1 Freescale MMA7455 -kiihtyvyysanturi.....	29
5.2 Rajoitukset .....	32
5.3 Mahdollisuudet .....	33
6 TOTEUTUSSUUNNITELMA.....	34
6.1 Ohjelmiston arkkitehtuuri.....	35
6.1.1 Tärkeimmät funktiot .....	36
6.1.2 Laiteohjelmistojen variantit .....	36
6.2 TOF-sovellus .....	37
6.3 Tietojen yhdistäminen .....	38
7 PAIKANNUKSEN TARKKUUDEN PARANTAMINEN.....	41
7.1 Raja-arvot mittaustuloksille .....	41

7.2 Keskiarvoistus .....	42
7.2 Kalman-suodatus .....	42
8 YHTEENVETO .....	45
9 POHDINTA .....	47
LÄHTEET .....	49

## LYHENNELUETTELO

API	Application Programming Interface, ohjelmointirajapinta.
ASIC	Application Specific Integrated Circuit, sovelluskohtainen mikropiiri.
CPU	Central Processing Unit, tietokoneen suoritin, joka suorittaa konekielisiä käskyjä.
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, vuoronvaustekniikka tietoverkossa.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö.
ISM	Industrial, Scientific, Medical, maailmanlaajuinen lupavapaa radiotaajuuskaista, joka on tarkoitettu teolliseen, tieteelliseen ja lääketieteelliseen käyttöön.
LNA	Low Noise Amplifier, pienikohinainen vahvistin.
LOS	Line of Sight, suora näköyhteys.
MAC	Medium Access Control, siirtoyhteyshierarkia tietotekniikassa.
PC	Personal Computer, tietokone.
PHY	Physical Layer, fyysinen kerros.

RAM	Random Access Memory, tietokoneen käyttömuisti, johon ladataan käytettävät ohjelmat.
ROM	Read Only Memory, tietokoneen pysyväismuisti, johon ei voi tehdä muutoksia
RISC	Reduced Instruction Set Processor, yksinkertaistettu tietokoneen suoritin.
RSSI	Received Signal Strength Indication, signaalin voimakkuuteen perustuva tekniikka.
SMA	SubMiniature version A, koaksiaalikaapelin liitintyyppi.
TOF	Time of Flight, signaalin kulkuaikaan perustuva tekniikka.
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter, sarjaliikennepiiri, joka muuntaa rinnakkaismuotoista tietoa sarjamuotoiseksi.
USB	Universal Serial Bus, tietokoneen sarjaväylä, joka on kehitetty oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen.
WPAN	Wireless Personal Area Network, langaton likiverkko.
WSN	Wireless Sensor Network, langaton sensoriverkko.



# 1 JOHDANTO

Insinööri työ tehtiin Oulun seudun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikössä. Työn tavoitteena oli kehittää Jennic Ltd:n kehitysympäristöön paikannusjärjestelmä, jossa käytetään ICDNET-hankkeessa hyväksi havaittuja liikemäärää ja radiopaikannukseen perustuvia algoritmeja. Tavoitteena oli tarkka paikannusjärjestelmä, joka käyttää kiihtyvyyssanturin mittaustuloksia ja radiopaikannusta paikantamiseen. Pieni koko, alhainen virrankulutus ja hyvä häiriönsieto olivat tärkeitä lähtökohtia järjestelmää kehitettäessä, koska laitteet toimivat paristoilla tai akuilla ja kulkevat paikannettavan mukana sekä käyttävät tiedonsiirtoon radioverkkoa.

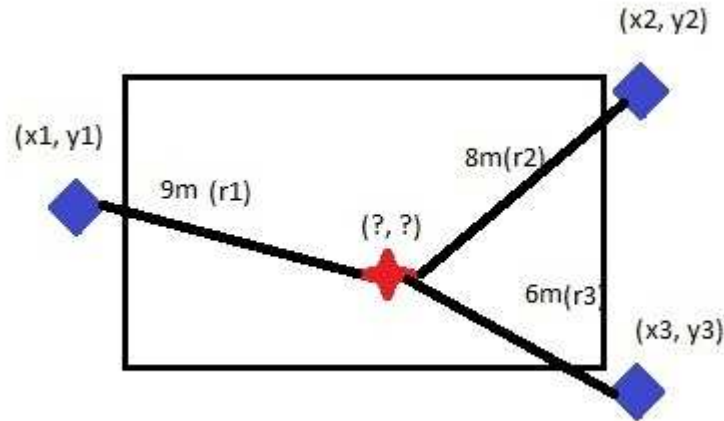
Jalkapallon MM-kisat käynnistyivät samoihin aikoihin, kun tätä työtä alettiin tehdä, ja sain siitä idean työn tavoitteeksi. Tavoitteena oli kehittää paikannusjärjestelmä, jolla voidaan paikantaa jalkapallon pelaaja jalkapallokentän kokoisella alueella. Tässä työssä keskityttiin paikannusjärjestelmän suunnittelemiseen, eikä paikannusjärjestelmää rakennettu valmiiksi.

## 2 WSN-PAIKANNUS

Jotta voitaisiin paikantaa liikkuvia kohteita tietyllä alueella on kehitettävä tilanteeseen sopiva paikannusjärjestelmä. Tässä työssä keskitytään liikemäärävusteisen radiopaikannusjärjestelmän kehittämiseen. Liikemäärävusteinen radiopaikannus soveltuu käytettäväksi tilassa, jossa satelliittipaikannus ei ole mahdollista, esimerkiksi sisätiloissa. Käyttämällä paikannukseen myös kiihtyvyyssanturimittauksia saavutetaan järjestelmä, joka sietää paremmin radiosignaalin häiriöitä, kuten monitie-etenemistä, ja muiden radiolaitteiden aiheuttamaa häiriötä. Kehittämällä järjestelmää yhä eteenpäin voidaan paikantaa jopa useaa kohdetta samanaikaisesti. Merkittävimpiä rajoittavia tekijöitä paikannusjärjestelmälle ovat laitteiden välinen radiokantama, paristojen kesto-aika ja mittaustarkkuutta heikentävät radiohäiriöt.

### 2.1 Paikannusjärjestelmän kuvaus

Liikemäärävusteinen radiopaikannusjärjestelmä toimii yksinkertaistettuna siten, että pääosin käytetään kiihtyvyyssmittauksiin perustuvaa paikannusta, jota kalibroidaan sopivin aikavälein signaalin kulkuaikaan perustuvalla radiopaikannuksella. Radiopaikannukseen tarvitaan vähintään kolme kiinteää ankkuripistettä, joiden paikat tiedetään. Paikannettava päätelaite liikkuu ankkuripisteiden kantoalueella. Liikkuvan laitteen etäisyyksiä ankkuripisteisiin mitataan jatkuvasti. Mitatut etäisyydet siirretään isäntälaitteen UART-liitännän ja sarjaportin kautta PC:lle tietokantaan, jossa lasketaan liikkuvan laitteen paikka trilateraatioperiaatteella kuvan 1 ja kaavan 1 mukaisesti. (1, s. 19–20.)



KUVA 1. Esimerkkikuva paikannuksesta trilateraatioperiaatteella kiinteiden ankkuripisteiden avulla (1, s. 20)

$$2 * \begin{bmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad \text{KAAVA 1.}$$

$x_u$  ja  $y_u$  ovat jalkapalloilijan koordinaatit.

Liikemäärään perustuva paikannus käyttää kiihtyvyyksanturilta saatuja mittauksia, joiden perusteella lasketaan uusi paikkatieto. Kun tiedetään tämänhetkinen paikka, kiihtyvyys ja nopeus, voidaan laskea uusi paikka.

Ideaalitilanteessa pelkkä liikemäärätietoihin perustuva paikannus olisi täysin riittävä tarkkaan paikannukseen. Käytännön maailma ei ole kuitenkaan ideaalista, vaan mitattuun tietoon sisältyy aina ympäristöstä ja laitteesta itsestään johtuvaa mittausvirhettä, joka heikentää tarkkuutta. Liikemäärään perustuvan paikannuksen virhe kumuloituu, koska edellinen virhe sisältyy aina uuteen  $(n + 1)$  paikkatietoon. Koska virheen määrä kumuloituu paikkatietoja laskettaessa pelkän kiihtyvyydestiedon perusteella, on tarpeen ottaa paikkatieto välillä radiopaikannuksen avulla.

## 2.2 IEEE 802.15.4 -standardi

IEEE 802.15.4 -standardi määrittelee lyhyen radiokantaman tietoliikenneverkon kaksi alinta kerrosta, fyysisen kerroksen ja siirtoyhteyskerroksen. Ylempiä kerroksia ei tarkemmin määritellä. Standardi on kehitetty WSN-verkkoja varten, joiden laitteet ovat yksinkertaisia, edullisia ja vähävirtaisia ja joissa tiedonsiirtomäärät ovat pieniä. Myös Zigbee- ja 6LoWPAN-teknologiat pohjautuvat IEEE 802.15.4 -standardiin. Tyypillisiä sovelluksia ovat sensoriverkot, interaktiiviset lelut, kauko-ohjaus sekä kodin automaatio. (2.)

IEEE 802.15.4 -standardin ominaisuudet

- Tiedonsiirtonopeudet 250 kbit/s, 40 kbit/s ja 20 kbit/s.
- Kaksi osoitemuotoa: 16-bittinen lyhytosoite ja 64-bittinen IEEE-osoitteistus.
- Sopii nopean latenssin sovelluksille, esimerkiksi ohjaussauvoihin.
- CSMA/CA-vuoronvaraus.
- Automaattinen verkon muodostus.
- Täysi kättelyprotokolla luotettavaan tiedonsiirtoon.
- Tehokkaat virransäästötoiminnot.
- 16 kanavaa 2,45 GHz:n ISM-kaistalla, 10 kanavaa 915 MHz:n kaistalla ja yksi kanava 868 MHz:n taajuuskaistalla. (2.)

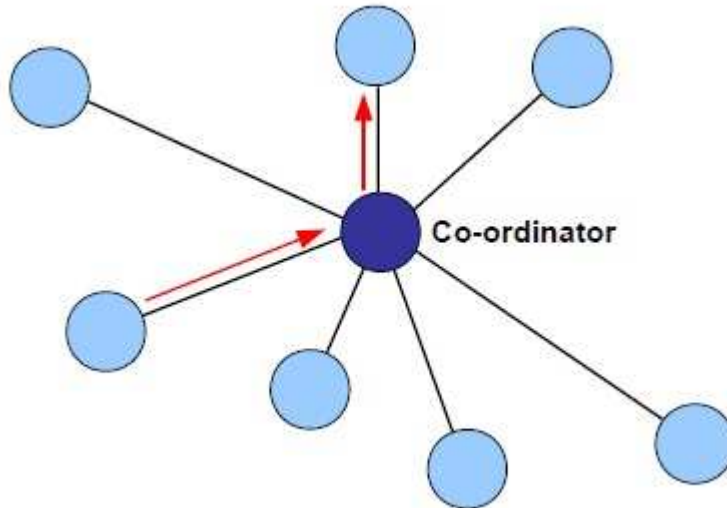
Tässä työssä käytetyt Jennicin laitteet käyttävät lupavapaata 2,45 GHz:n taajuuskaistaa. Samalla kaistalla toimivat myös Bluetooth-laitteet, langattomat lähiverkot sekä mikroaaltouunit.

## **2.3 WPAN-radioverkon topologiat**

Jennic 5148 -kehitysympäristö tarjoaa tuen usealle eri verkkotopologialle. Sovelluksessa, jossa paikannetaan yhtä liikkuvaa laitetta, radiopaikannusverkon topologiaksi soveltuu parhaiten tähtiverkko. Verkon rakenne on tällöin yksinkertainen ja tarjoaa riittävät komponentit radiopaikannukseen. Tällöin paikannettava laite on yhteydessä kolmeen paikallaan olevaan ankkurilaitteeseen. Tässä työssä topologiaksi on valittu muokattu versio tähtiverkosta, jotta jatkossa olisi mahdollista lisätä paikannettavia tajeja. (3, s. 15–17.)

### **Tähtiverkko**

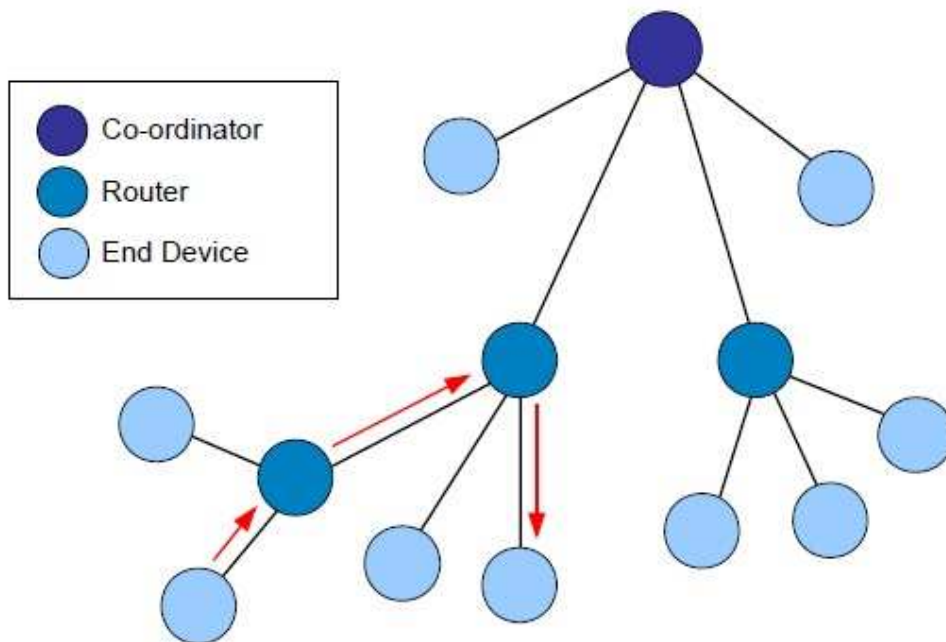
- Verkossa on yksi laite, koordinaattori, jonka kautta liikenne reititetään, kuten kuvassa 2.
- Tähtiverkko soveltuu parhaiten pieneen verkkoon, jossa on vähän liikennettä ja päätelaitteet ovat radiokantaman etäisyydellä koordinaattorista. (3, s. 15.)



*KUVA 2. Tähtiverkon topologia (3, s. 15)*

### **Puuverkko**

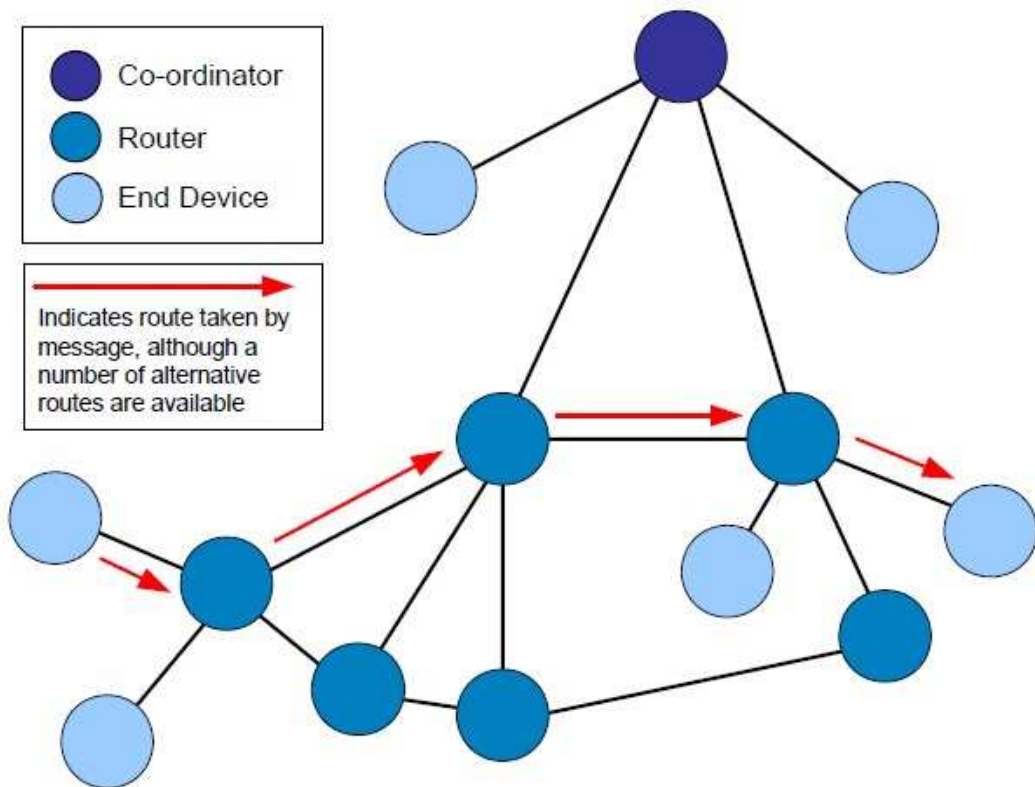
- Verkossa on kolmenlaisia laitteita: koordinaattoreita (Co-ordinator), reitittimiä (Router) ja päätelaitteita (End Device). Koordinaattori voi olla linkitettyä joukkoon reitittimiä ja päätelaitteita. Reititin voi edelleen olla linkitettyä muihin reitittimiin ja päätelaitteisiin. Tämä voi jatkua usealle tasolle, kuten kuvassa 3.
- Puuverkko soveltuu parhaiten isompiin verkkoihin ja suurempiin tiedonsiirtomääriin. (3, s. 15–16.)



KUVA 3. Puuverkon topologia (3, s. 16)

### Mesh-verkko

- Verkossa on myös kolmenlaisia laitteita: koordinaattoreita, reitittimiä ja päätelaitteita. Kaikki radiokantaman sisällä olevat solmupisteet voivat kommunikoida keskenään. Kuitenkin päätelaite voi kommunikoida ainoastaan oman reitittimen ja koordinaattorin kanssa.
- Reitittimet osaavat välittää viestit solmupisteiden yli, kuten kuvassa 4. Mahdollisia reittejä voi olla useita.
- Mesh-topologia soveltuu parhaiten hajanaisiin ja muuttuviin verkkoihin älykkään reitityksen takia. (3, s. 16.)



*KUVA 4. Mesh-verkon topologia (3, s. 16)*



### 3 JENNIC-LAITTEISTO

Kehitetty paikannusjärjestelmä on rakennettu Jennic Ltd:n valmistaman kehityspaketin pohjalle, joka on nimeltään JN5148-EK-010. Kehityspaketti sisältää laitteet ja perusohjelmiston pienen kantaman radioverkon rakentamiseen. Järjestelmän ytimenä on WSN-sovelluksia varten kehitetty JN5148-mikrokontrolleri. Kehityspaketin avulla voidaan kehittää ZigBeePro-, JenNet- ja IEEE 802.15.4 -standardin pohjaisia pienen kantaman radioverkkosovelluksia JN5148-mikrokontrollerille. Paketissa on yksi LCD-näytöllä ja radiomoduulilla varustettu koordinaattorilaite sekä neljä päätelaitetta varustettuna radiomoduulilla. Kuvassa 5 on esillä kehityspaketin mukana toimitettavat laitteet. Lisääntenni voidaan liittää radiomoduuliin SMA-liittimellä, jolloin saavutetaan parempi radiokantama. (3.)



*KUVA 5. Jennic 5148 Evaluation Kit -laitteisto (3, s. 8)*

### 3.1 Ohjelmiston kehitysympäristö

Ohjelmiston kehitysympäristöksi on tarjolla Eclipse IDE, ohjelmistokirjastot ja ohjelmistorajapintoja. Eclipsellä voidaan kehittää C/C++-kielisiä ohjelmia. Ohjelmistorajapintojen avulla voidaan ohjelmoida ja kehittää JN5148-piirin toimintoja, kuten verkon hallintaa, tiedonsiirtoa ja piirille integroituja toimintoja. TOF API on tarpeen, kun halutaan käyttää ja muokata TOF-mittausta. Paketin mukana toimitetaan FlashProgrammer.exe-ohjelma sekä UART-USB-kaapeli ajureineen tiedonsiirtoa ja mikrokontrollerin ohjelmointia varten. (3.)

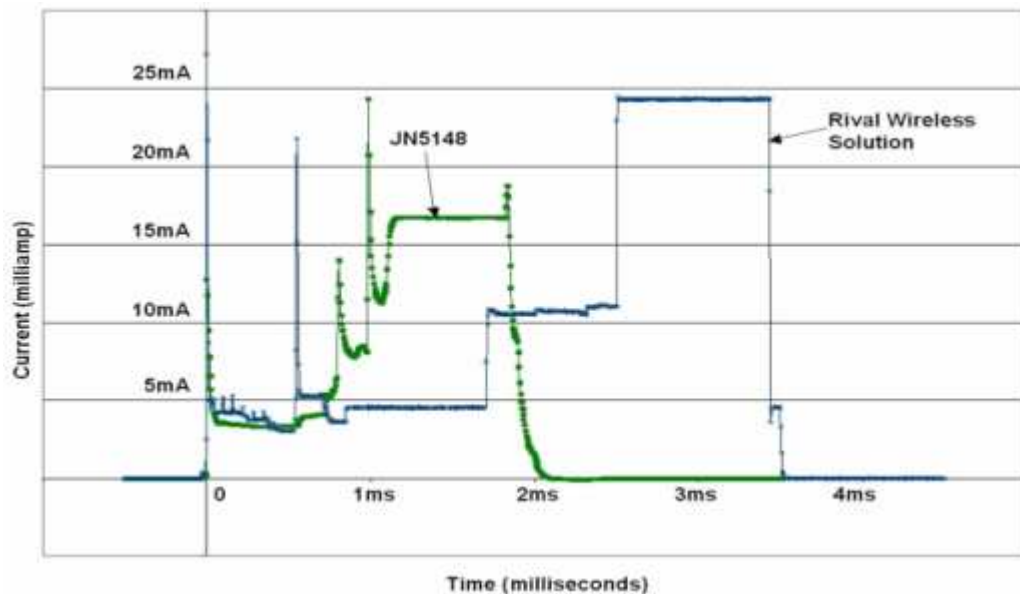
### 3.2 Virrankulutus

Laitteet saavat virran kahdesta AA-paristosta tai vaihtoehtoisesti tasavirtamuuntajan kautta sähköverkosta. Myös aurinkokennon käyttö virtalähteenä on mahdollista. Komponenttien kehityksessä on panostettu erityisesti pienen virrankulutukseen ja pieniin lepovirtoihin. Laitteet toimivat itsenäisesti ja niissä on erittäin kehittyneet lepotilatoiminnot virransäästöä varten. Laittevalmistaja lupaa paristoille jopa viiden vuoden käyttöajan. (5, s. 1.)

JN5148 mikrokontrolleri hoitaa kaikki sensorimittaukset ja -säädöt, järjestelmän energiansäästötoiminnot ja kommunikoinnin IEEE 802.15.4 -verkon kautta varsin energiatehokkaasti. Lepovirta on saatu pudotettua 1,25  $\mu\text{A}$ :iin ja varauksen tarve 61  $\mu\text{C}$ :iin, kun lähetetään 2,4 GHz signaalia. Virrankulutus on tällöin datalehden mukaan 18 mW kolmen voltin jännitteellä, mikä on noin 35 % vähemmän vastaavaan langattomaan sovellukseen verrattuna, kuten kuva 6 osoittaa. Käynnistysaikaa lepotilasta lähetystilaan on saatu parannettua merkittävästi aikaisempaan verrattuna, mikä osaltaan mahdollistaa tehokkaamman lepotilan käytön. (5, s. 6.)

Käytännön tilanteen virrankulutus mitattiin Fluke 79 -yleismittarilla paristojen navoista TOF-mittauksen ollessa päällä. Virrankulutus oli tällöin 18 mW, joka

on sama, minkä laitevalmistaja ilmoittaa virrankulutukseksi. Kahdella sarjaan kytketyllä AA-paristolla saadaan tehtyä 3 voltin käyttöjännite ja saavutetaan jopa 40 tunnin käyttöaika TOF-mittauksiin.



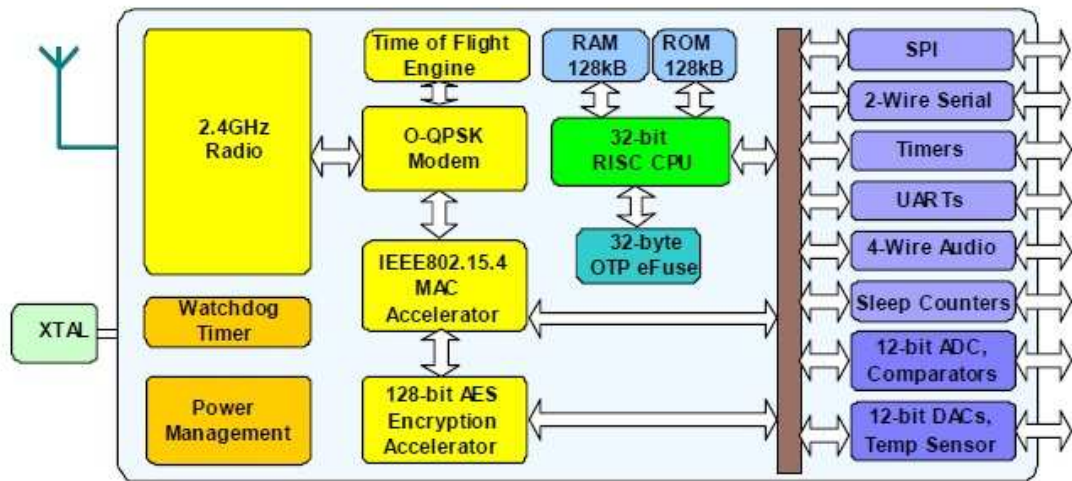
KUVA 6. JN5148-piirin virrankulutus verrattuna kilpailijaan (5, s. 6)

### 3.3 RISC-prosessori

CPU:n tehtäviä hoitaa 32-bittinen RISC, joka toimii tarpeen mukaan kellotaajuudella 4–32 MHz. Tehokas prosessori mahdollistaa ohjelman ajamisen piirillä. Prosessoriteho jaetaan IEEE 802.15.4:n mukaisen MAC-protokollan, muiden korkeampien kerrosten protokollien ja käyttäjän sovelluksen kesken. JN5148-piirillä on 128 kilotavua ROM-muistia, 128 kilotavua RAM-muistia ja 32 tavun kokoinen kerran ohjelmoitava eFuse-muisti. (5, s. 15–17.)

### 3.4 Jennic 5148 -radiomoduuli

Radiolohko sisältää kuvan 7 mukaisesti lohkot 2,45 GHz:n radiolle, modeemille ja kantataajuuskontrollerille sekä tietoturvalohkon, jossa on apuprosessori tietoturvaa varten. Lisäksi radiolohkossa on ulostulokytkentä ulkoiselle pääteasteen vahvistimelle pitkän kantaman sovelluksille.



KUVA 7. JN5148-piirin lohkokaavio (5, s. 1)

Tietoturvalohko tarjoaa laitepohjaisen 128-bittisen AES-CCM-salauksen ja tunnistuksen, jotka on määritelty IEEE 802.15.4 2006 -standardissa. Radio-lohkot toimivat yhdessä tuottaen IEEE 802.15.4 MAC:n, jota ohjaa protokollapino. Sovelluksia, jotka käyttävät IEEE 802.15.4 -toimintoja, voidaan kehittää nopeasti ja helposti yhdistämällä käyttäjän ohjelmistosovellus protokollapinin kirjastoon. (5, s. 1.)

Radio-osasta on tarjolla kolme varianttia:

- JN5148-001-M00, jossa on integroitu antenni, lähetysteho 2,5 dBm, vastaanottimen herkkyys –95 dBm.
- JN5148-001-M03, jossa on antenniliitin, lähetysteho 2,5 dBm, vastaanottimen herkkyys –95 dBm. Kantama jopa 1 km antennista riippuen.
- JN5148-001-M04, jossa on antenniliitin, tehovahvistin ja LNA. Lähetysteho 20 dBm, vastaanottimen herkkyys –98 dBm.

## 4 RADIOPAIKANNUS

JN5148-mikrokontrollerissa on valmius etäisyyden määrittämiseen kahden laitteen välillä signaalin kulkuajan perusteella. Menetelmä perustuu pikosekuntien tarkkaan radiosignaalin kulkuajan mittaamiseen kahden laitteen välillä.

Toinen mahdollinen menetelmä, jota on myös yleisesti käytetty etäisyyden mittaamiseen, perustuu radiosignaalin vapaan tilan vaimenemiseen ja vastaanotetun tehon mittauksiin. Tätä vastaanotetun signaalin tehon mittaukseen perustuvaa etäisyysmittaustekniikkaa kutsutaan lyhenteellä RSSI.

### 4.1 Etäisyysmittaukset radiosignaalin avulla

Etäisyyden mittauksen tarkkuus TOF-menetelmällä on huomattavasti tarkempi verrattuna RSSI-menetelmään, kun mitattava etäisyys on yli 5 metriä. Pienemmillä etäisyyksillä RSSI on tarkempi. Savarese, Rabaey ja Beutel saivat raportissaan RSSI:n tarkkuudeksi etäisyysmittauksissa  $\pm 50$  %. RSSI soveltuu kuitenkin hyvin paikannukseen, jossa ei ole tarvetta hyvään tarkkuuteen ja mitattava etäisyys on pieni. Radioverkkojen laitteissa on lähes aina valmiina saapuvan signaalin tehon mittaus, joten RSSI on kustannustehokas tapa ottaa radiopaikannus käyttöön. (6, s. 7.)

RSSI:n tarkkuus pienillä etäisyyksillä perustuu siihen, että radiosignaali vaimenee eksponentiaalisesti suhteessa välimatkaan. Tällöin ensimmäisten metrien matkalla radiosignaalin vaimeneminen on nopeinta ja pienikin välimatkan muutos on helpommin mitattavissa. Etäisyys  $d$  voidaan laskea kaavalla 2, kun tunnetaan lähetetty ja vastaanotettu teho. (7, s. 14.)

$$d = 0,02 * 10^{\left(\frac{108-RSSI}{20}\right)}$$

KAAVA 2.

Pidemmällä välimatkalla TOF:n parempi tarkkuus perustuu siihen, että radiosignaalin kulkuaika kasvaa lineaarisesti välimatkan kasvaessa. Radiosignaalin nopeus on valonnopeus (299 792 458 m/s). Signaalilla kuluu aikaa esimerkiksi 10 metrin matkaan 33 nanosekuntia. Mittauksen tarkkuuteen vaikuttavat olennaisesti laitteiden kellojen synkronointi ja kellon tarkkuus. Kellon tarkkuuden vaikutus matkavirheeseen pienenee riittävästi, kun välimatka kasvaa reiluun 5 metriin. Liian lyhyellä matkalla kellon tarkkuus ei riitä, joten etäisyysmittaus on epätarkka. Sovelluksessa, jossa mitataan useiden metrien välimatkoja, on järkevää käyttää TOF-mittausta.

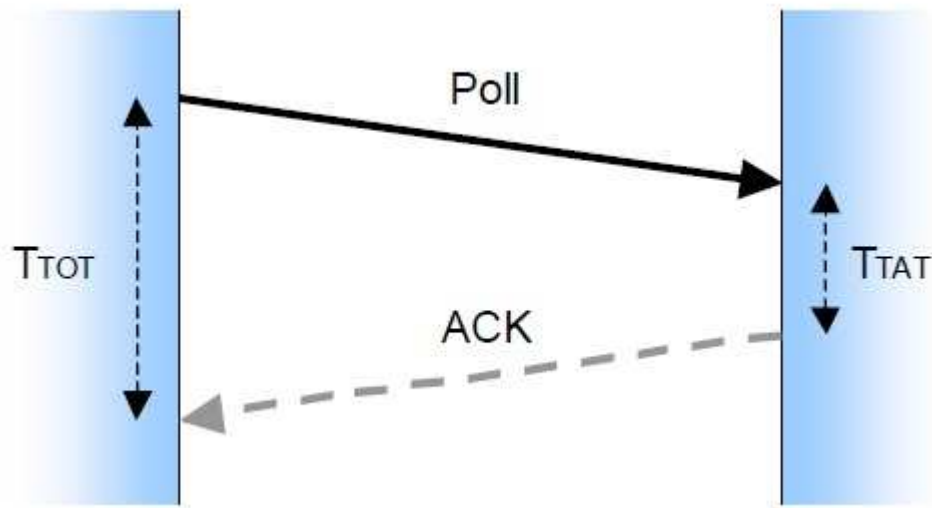
## 4.2 TOF-mekanismi

Jennic 5148 -mikrokontrollerin laitepohjainen TOF-ohjelmistorajapinta kykenee mittaamaan 2,45 GHz:n signaalin kulkuajan kahden laitteen välillä. Liikkuva laite lähettää tiedustelupaketin (Poll) ja kuittauspyynnön ankkurilaitteelle, ja ankkurilaitte kuittaa (ACK) saatuaan paketin, kuten kuva 8 havainnollistaa. Signaalin kulkuaika lasketaan pakettien aikaleimoista, jotka on merkitty kuvassa 8 symbolein  $T_{TOT}$  ja  $T_{TAT}$ . Laitteiden välinen matka lasketaan kaavalla 3. (7, s. 8.)

$$d = \left( \frac{T_{TOT} - T_{TAT}}{2} \right) c$$

KAAVA 3.

$d$  = etäisyys,  $T_{TOT}$  = kokonaisaika,  $T_{TAT}$  = kuittauksen lähettämiseen kulunut aika ja  $c$  = valonnopeus. (7, s. 8.)



KUVA 8. TOF-mekanismi. Yhteen Poll-ACK-purskepariin kuluu aikaa noin 4 ms. (7, s. 7.)

Käytännössä mittauksia tehdään useita, jotta saavutetaan parempi häiriöiden sieto ja mittaustarkkuus. Laitteiden kellojen synkronointivirhettä voidaan pienentää huomattavasti tekemällä TOF-mittaukset kahteen suuntaan. Mitataan liikkuvasta laitteesta ankkuriin sekä ankkurista liikkuvaan laitteeseen. (7, s. 7–8.)

Tarkka etäisyyden mittaustulos saadaan vain silloin, kun radiopurske kulkee suoraan kahden laitteen välillä. Käytännössä tapahtuu kuitenkin radiopurskeen monitie-etenemistä ja vastaanotettu purske on yhdistelmä suoraan edenneitä ja heijastuneita, monitie-edenneitä paketteja. Varsinkin voimakkaat monitie-edenneet purskeet heikentävät TOF-mittauksen tarkkuutta.

Mittaustarkkuutta voidaan parantaa käsittelemällä mittaustuloksia. Mittaustuloksista voidaan esimerkiksi karsia pois negatiiviset arvot ja asettaa tuloksille raja-arvot sekä laskea ehdot täyttävistä tuloksista keskiarvo. Mittaustulosten käsittely vaatii kuitenkin mikrokontrollerilta resursseja ja hidastaa jonkin verran mittausta, joten mittaustulosten käsittelyprosessi täytyy pitää sopivan kevyenä.

#### 4.2.1 Mittausnopeus

Järjestelmää suunniteltaessa on erittäin tärkeä tietää, kuinka nopeasti laiteisto kykenee mittaamaan etäisyyksiä. Laitevalmistajan teknisten tietojen mukaan yhteen datapakettiin mahtuu 11 mittaustulosta. Jos mittauksia halutaan ottaa enemmän, täytyy lähettää useampi paketti mittaustuloksia. Yhteen Poll-ACK-pariin kuluu aikaa 4 ms. Lisäksi siirtotien avaus, datan keräys ja lähettäminen kuluttavat 6 ms. Teoreettiset mittausnopeudet on esitetty taulukossa 1. (7, s. 8.)

*TAULUKKO 1. TOF-etäisyysmittausten nopeus teoriassa*

Poll-ACK -pareja	Paketteja	Aika[ms]
1	1	10
5	1	26
10	1	46
11	1	50
22	2	100
33	3	150
44	4	200
55	5	250
110	10	500
220	20	1000

Laitteiston todellinen mittausnopeus testattiin eri etäisyyksillä ottamalla noin 6000 mittausta. Yhteen mittaukseen kulunut aika laskettiin aikaleimoista. Suurimmaksi mittausnopeudeksi saatiin noin 210 etäisyysmittausta sekunnissa, kuten taulukko 2 havainnollistaa. Hyvissä olosuhteissa laitteistolla pääsee siis hyvin lähelle teoreettista maksiminopeutta, joka on 220 mittausta sekunnissa. Huonoissa olosuhteissa mittausnopeus pienenee jopa alle 50 mittaukseen sekunnissa.



TAULUKKO 2. Testattu mittausnopeus.

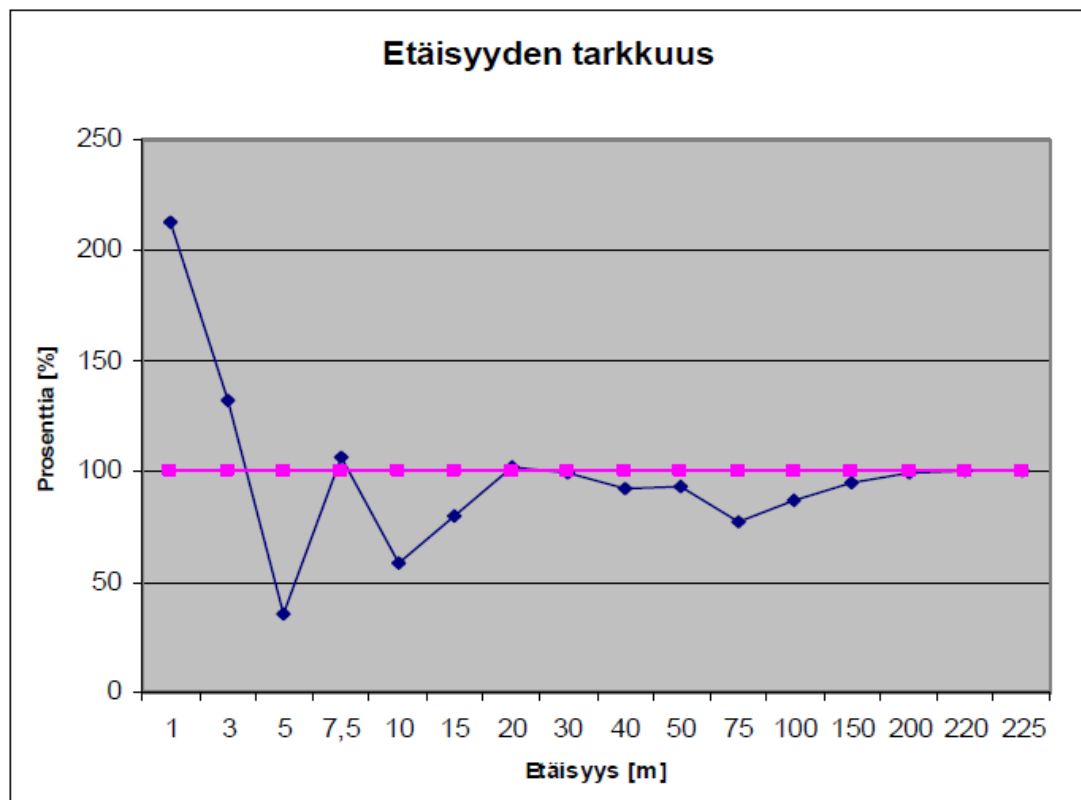
Etäisyys [m]	Vast. otettu	Mitattu aika [s]	Sekunnis- sa
1	4850	21,6	224,5
3	4591	22,5	204
5	5220	24,7	211,3
7,5	5501	26,2	210
10	6010	28,6	210,1
15	6460	31,2	207,1
20	5451	26	209,7
30	6882	33,1	207,9
40	6170	34,7	177,8
50	8060	39,2	205,6
75	6982	38,1	183,3
100	5350	25,8	207,4
150	6369	30,3	210,2
200	6661	32,1	207,5
220	6450	30,7	210,1
224,5	1850	43	43

#### 4.2.2 Mitattava etäisyys TOF-menetelmällä

Laitevalmistaja lupaa laitteiden kantamaksi jopa 1000 metriä ulkoista antennia käyttämällä. Tehovahvistimella ja ulkoisella antennilla varustettu moduuli kykenee laitevalmistajan mukaan jopa 4 kilometrin yhteysväliin. Laitevalmistajan mukaan tehovahvistimella varustettu moduuli ei kuitenkaan sovellu TOF-mittauksiin, koska mittausvirhe kasvaa niillä olennaisesti.

Laitteiston todellinen radiokantama selvitettiin työn taustatiedoiksi mittaamalla. Mittaukset suoritettiin suoralla pyörätien suoralla. Laitteet olivat 1,4 metrin korkeudella maan pinnasta ja ympärisäteilevät antennit olivat pystyasennossa. TOF-etäisyysmittauksia tehtiin erilaisilla välimatkoilla, jotta saatiin selville järjestelmän optimaalinen mittausalue. Taulukosta 3 nähdään, että paras tarkkuus saadaan, kun mitattava etäisyys on välillä 20–224,5 metriä. Maksimietäisyys on mitattu laittamalla laitteet päälle, kun ne olivat 224,5 metrin etäisyydellä toisistaan. Tällöin yhteys muodostui vielä hyvin laitteiden välille ja TOF-pakettien lähetys onnistui vielä yli 95,5 %:n todennäköisyydellä. (13, s. 89.)

TAULUKKO 3. Etäisyysmittauksen tarkkuus (13, s. 89)

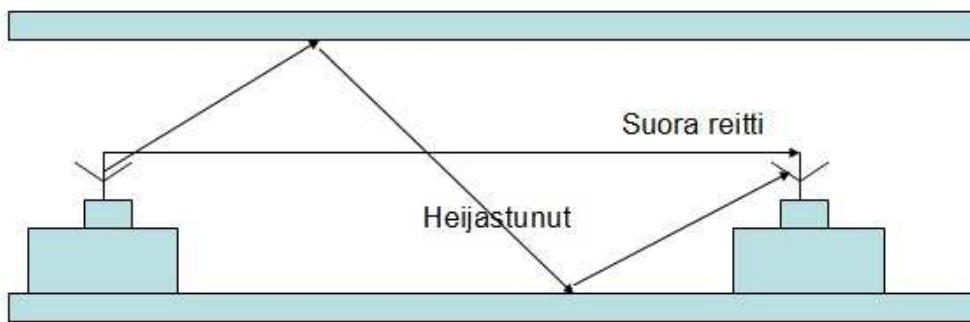


#### 4.2.3 Häiriöt TOF-mittauksissa

Erilaiset häiriöt haittaavat TOF-mekanismin toimintaa. Järjestelmää kehitettäessä on erittäin tärkeää tietää, minkälaiset häiriöt vaikuttavat järjestelmään ja minkälaiset vaikutukset kullakin häiriötekijällä on järjestelmän toimintaan. Häiriöt voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan, radiohäiriöt ja kellosignaalin synkronointiin liittyvät häiriöt. Radiohäiriön tapauksessa etäisyysmittausten tulokset ovat liian pitkiä tai tuloksia ei tule lainkaan. Kellosignaalin häiriötapauksessa etäisyysmittausten tulokset voivat olla liian pitkiä tai liian lyhyitä.

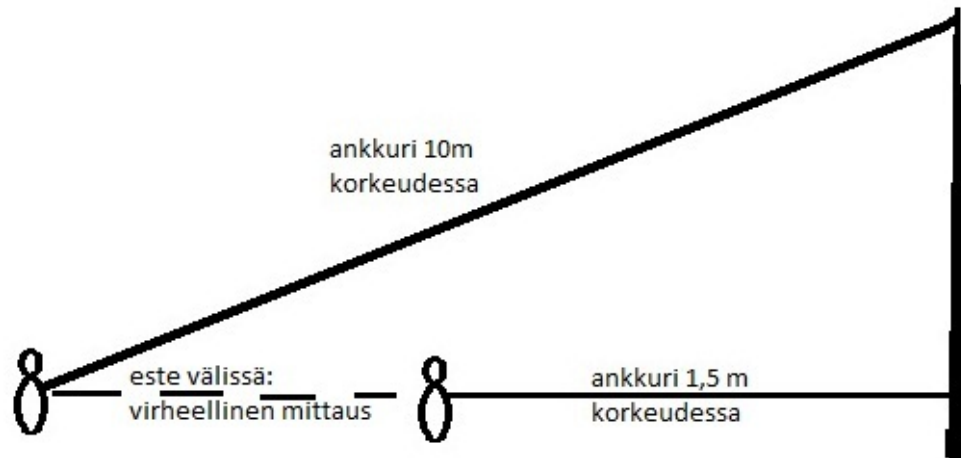
## Radiohäiriöt

Monitie-etenemisestä johtuvissa häiriötilanteissa radioaalto heijastuu kiinteästä kohteesta ja saapuu vastaanottimeen useaa eri reittiä eritehoisina ja erivaiheisina komponentteina, kuten kuvassa 9. Vastakkaisvaiheiset aallot kumoavat toisensa, jolloin tapahtuu häipymistä. Toisaalta heijastunut signaali kulkee pidemmän reitin, jolloin etäisyysmittaukseen tulee virhettä. Tuloksena on liian pitkä mittaustulos.



KUVA 9. Radiosignaalin monitie-eteneminen

Kun TOF-laitteiden välissä on fyysinen este, esimerkiksi ihminen, se vääristää etäisyysmittausta noin 18 metriä todellista pidemmäksi, kun mitataan 50 metrin etäisyyttä. Tämä on todettu käytännössä Jennic-laitteistoa testaamalla. Tätä virhettä voidaan pienentää asentamalla ankkurit noin 10 metrin korkeuteen, kuten kuvassa 10, jolloin suora näköyhteys laitteiden välillä säilyy paremmin. Tällöin toiset pelaajat ovat kriittisen Fresnelin alueen ulkopuolella eivätkä häiritse suoraa radioyhteyttä laitteiden välillä. (13, s. 89–90; 14, s. 8.)



KUVA 10. Ankkurin sijoittaminen

Vastaanottimen tukkeutuminen ja interferenssi-ilmiö toteutuvat, kun muut samassa paikassa ja samalla radiokaistalla lähettävät laitteet aiheuttavat interferenssi-ilmiön ja tukkivat vastaanottimen. Tällöin vastaanotto ei enää onnistu. Värähtelijät, kuten ilmamolekyylit, joutuvat useaan samanaikaiseen aaltoliikkeeseen. Esimerkiksi mikroaaltouuni tai WLAN-tukiasema, jotka käyttävät samaa 2,45 GHz:n taajuusaluetta, kasvattavat interferenssin mahdollisuutta. Interferenssiä voidaan välttää valitsemalla hiljainen taajuuskanava ja poistamalla häiriölähteet. (15, s. 41–43.)

### Kellojen synkronointivirhe

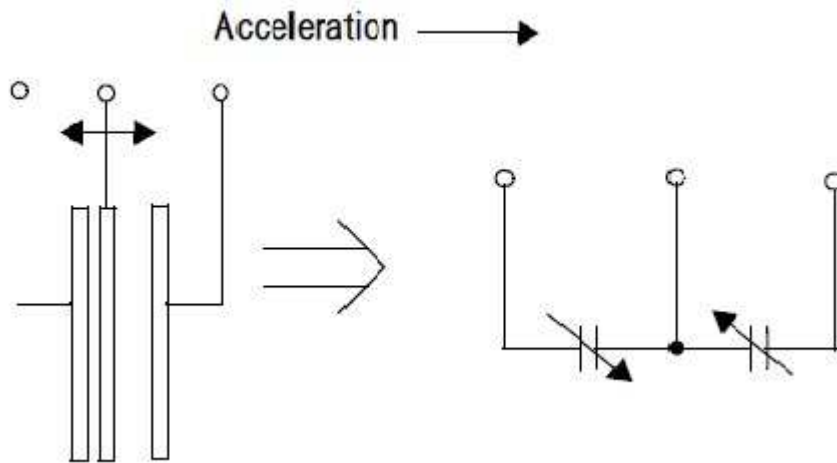
Laitteen kellosignaali on virheellinen, jolloin TOF-paketin kulkuajan mittausta epäonnistuu. Tuloksena on liian pitkä tai liian lyhyt mittaustulos. Laitteiden välinen kellovirhe saadaan selville mittaamalla kulkuajat molempiin suuntiin – jalkapalloilijasta ankkuriin ja päinvastoin. Tällöin tunnettu kellovirhe voidaan ottaa huomioon, kun lasketaan kulku-aika.

## 5 KIIHTYVYYSANTURI PAIKANNUKSESSA

Kiihtyvyystietoja voidaan käyttää matkan ja nopeuden mittaamiseen joko integraalilaskennalla tai käyttämällä askelluksessa syntyviä kiihtyvyyspiikkejä askelmittaukseen. Integraalilaskennan avulla voidaan määrittää paikka, kun tiedetään alkunopeus ja kiihtyvyys ajan funktiona. Tällöin kuljettu matka voidaan laskea käyttämällä kaavaa 4. Askelmittaus ei sovellu jalkapalloilijan paikannukseen, koska pelaajan askelmitta muuttuu jatkuvasti pelin tiimellyksessä. Tämän vuoksi tässä työssä keskityttiin liikemäärään perustuvaan paikan määrittämiseen.

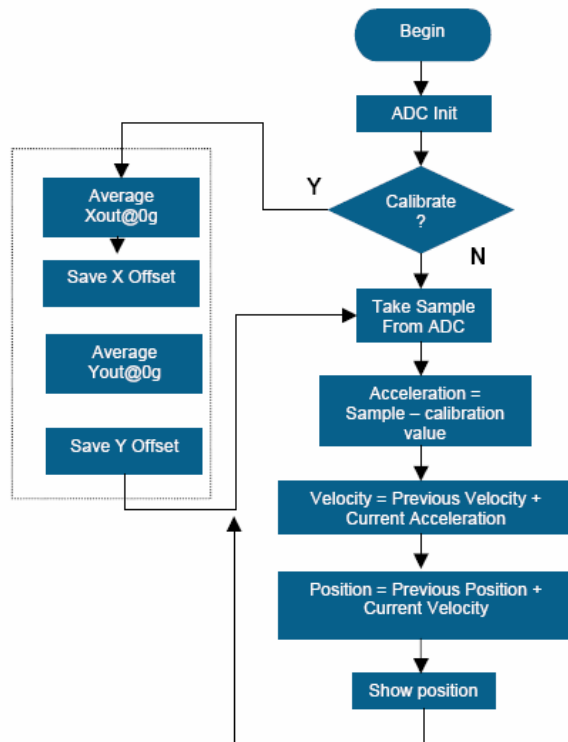
### 5.1 Freescale MMA7455 -kiihtyvyysanturi

Paikannusjärjestelmässä käytettävän Freescale MMA7455 -kiihtyvyysanturin toiminta perustuu piirin sisällä olevien levykondensaattoreiden kapasitanssin mittauksiin. Kiihtyvyys puristaa tai loitontaa kondensaattorin levyjä, jolloin kapasitanssi muuttuu, kuten kuvassa 11. ASIC vertaa kahden kondensaattorin kapasitanssieroja, suodattaa dataa ja tuottaa jännitteen, jonka suuruus on verrannollinen kiihtyvyyteen. Anturipiiri kykenee mittaamaan kiihtyvyyden kolmelta akselilta ja valittavissa on kolme herkkyysaluetta: 2g, 4g ja 8g. (8, s. 1–6.)



KUVA 11. Kiihtyvyyden mittaaminen kapasitanssin muutoksella (8, s. 6)

Kiihtyvyyssanturin mukana toimitetaan Freescalen kehittämä ohjelma, jota voi käyttää paikan määrittämiseen. Ohjelman toiminta on esitetty vuokaaviona kuvassa 12. Sovellusta on kehitetty ICDNET-hankkeessa eteenpäin tekemällä siihen simuloitu polun paikannus, joka piirtää polun (x,y)-koordinaatistoon paikkatietojen, nopeustiedon ja kiihtyvyystietojen perusteella. Simuloidussa polun paikannuksessa laitteen kokema kiihtyvyys ja sen suunta muutetaan ulkoisen tarkkailijan kokemaksi kiihtyvyydeksi. Täten sovellus osaa määritellä liikkeen suunnan oman koordinaatiston sijaan ulkoisen tarkkailijan koordinaatiston mukaisesti ja suunnan määrittäminen menee oikein. Kiihtyvyyssanturin lukemat saadaan ulos piiriltä Jennicin tagiin I<sup>2</sup>C-sarjaliikenteenä siten, että Jennicin mikrokontrolleri on isäntälaitte ja kiihtyvyyssanturi on apulaitteena. (9, s. 7; 12, s. 39–41.)



KUVA 12. Kiihtyvyystiетоjen muuttaminen paikkatiedoksi vuokaaviona (9, s. 7)

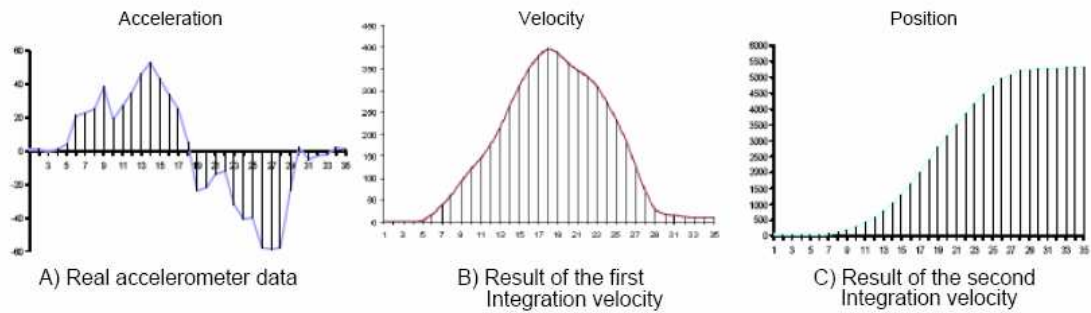
Nopeus ja matka saadaan laskettua kiihtyvyystiedoista käyttäen kiihtyvyyden määritelmää, joka on esitetty kaavassa 4 (10, s. 91).

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

KAAVA 4.

$a$  = kappaleen kiihtyvyys,  $v$  = kappaleen nopeus,  $x$  = matka,  $t$  = aika.

Nopeus  $v$  saadaan integroimalla kiihtyvyys  $a$  kerran. Paikka  $x$  ajan suhteen saadaan integroimalla kiihtyvyys kahdesti kuvan 13 mukaisesti.



KUVA 13. Paikan laskeminen integroimalla. A) kiihtyvyystiето, B) nopeuden muutos, C) paikka (9, s. 3)

## 5.2 Rajoitukset

Inertiapaikannuksella on joitakin rajoituksia, joita esitellään tässä luvussa. Kiihtyvyysanturilla tehtyjen paikannusmittausten tulokset huononevat, mitä enemmän peräkkäisiä mittauksia tehdään. Paikannustarkkuus huononee, kun mittausvirhe ja laitteistosta johtuvat virheet kumuloituvat aina seuraavaan mittaukseen. Tämän takia kiihtyvyySPAikannus täytyy tehdä lyhyissä pätkissä.

Mittausvirhettä syntyy, kun kiihtyvyysanturin asento ei pysy samana jalkapalloilijan liikkeessä. Tällöin kiihtyvyySPAikannuksen antama polku kulkee kiertyneessä koordinaatistossa, joka ei ole todellista tilannetta vastaava. Tämän takia kiihtyvyysanturi pitää asentaa sellaiseen paikkaan, jossa asento pysyy kenttään nähden mahdollisimman vakiona, esimerkiksi selkään. Virheiden takia paikkatieto täytyy välillä kalibroida radiopaikannuksen tuottamilla koordinaateilla riittävän usein. Matkan mittaaminen askeleita laskemalla ei sovelu jalkapalloilijan paikannukseen, koska jalkapalloilijan askelmitta vaihtelee jatkuvasti pelin tiimellyksessä.



### 5.3 Mahdollisuudet

Kiihtyvyydspiirillä on mahdollista mitata kiihtyvyyttä kolmessa ulottuvuudessa x-, y- ja z-koordinaatistossa, joten myös paikannus voi toimia kolmiulotteisesti. Inertiapaikannusta käytetäänkin lentokoneissa ja sukellusveneissä, joissa on tosin apuna myös kallis ja painava gyroskooppilaitteisto, joka pitää kiihtyvyydsanturin asennon stabiilina.

Radiohäiriöt tai radioyhteyden puute eivät vaikuta tarkkuuteen, koska inertiapaikannus toimii itsenäisesti. Tosin alkukoordinaatit ja -nopeus täytyy saada selville jotakin toista paikannusjärjestelmää käyttämällä.

Nykypäivän kiihtyvyydsanturit ovat kooltaan pieniä, pikkurillin kynnen kokoisia. Koon pienentyessä myös virrankulutus on saatu pudotettua alle 0,5 mA:iin, joten anturin voi sijoittaa hyvin vapaasti paikannettavaan kohteeseen pienen pariston kera. Tarkkuus on varsin hyvä, muutama kymmenen senttimetriä. Paikannusvirheen kumuloituminen ei haittaa merkittävästi, kun paikkatieto ja nopeus saadaan riittävän usein toisesta paikannusjärjestelmästä. (11, s. 8.)

## 6 TOTEUTUSSUUNNITELMA

Paikannusjärjestelmän järjestelmäsuunnittelu toteutetaan Jennic 5148 Evaluation Kit -kehitysympäristössä. Ohjelmiston muokkausta varten hankittiin laitevalmistajalta lisäksi TOF-API sekä TOF-funktiokirjastot.

Lisäksi paikannuksessa käytettävä kiihtyvyyssanturi on liitettävä liikkuvaan laitteeseen. Kiihtyvyyssanturin antamat paikkatiedot siirretään paikannusjärjestelmän käyttöön, Jennic 5148 -mikrokontrollerille, I<sup>2</sup>C-väylää käyttäen. Laite kannattaa kiinnittää pelaajan selkään, jotta kiihtyvyyssanturi pysyisi mahdollisimman stabiilissa asennossa kenttään nähden.

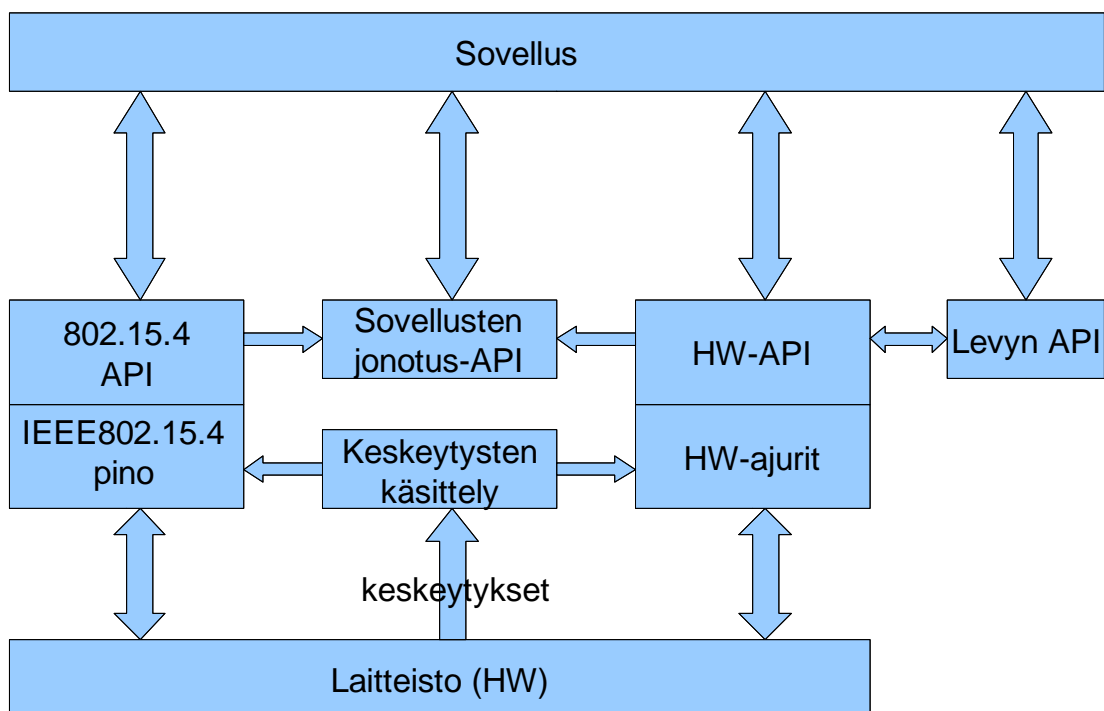
Koska paikannustietoa kertyy sekä kiihtyvyyssanturilta että radiopaikannuksesta, täytyy tiedot yhdistää järkevällä tavalla. Paikannustietojen yhdistäminen selvitetään luvussa 6.3. Järjestelmän toiminta on esitetty vuokaavion muodossa ja selitetty sanallisesti tämän luvun lopussa.

Lähtökohtana on ollut jalkapalloilijan paikantaminen pelikentällä. Pelaajan maksiminopeutena voidaan pitää 12,2 m/s, jonka jamaikalainen Usain Bolt saavutti sadalla metrillä Pekingin olympialaisissa vuonna 2008. Paikannettava pelaaja liikkuu alueella, joka on 90 x 120 m:n kokoinen suorakulmio.

Radioankkurit kannattaa asentaa ainakin 20 metrin etäisyydelle kentän laidasta, koska paras tarkkuus TOF-mittauksille saadaan etäisyydellä 20–220 metriä. Sopiva asennuskorkeus ankkureille on noin 10 metriä, jolloin suora näköyhteys laitteiden välillä säilyy muista pelaajista huolimatta, kuten kuvassa 10.

## 6.1 Ohjelmiston arkkitehtuuri

Ohjelmiston runko on Jennic Ltd:n kehittämä. Ohjelmiston arkkitehtuuri on esitetty kuvassa 14. Ohjelmiston pohjana on IEEE 802.15.4 -standardin mukaiset fyysinen kerros ja MAC-kerros. Implementoidut sovellukset toimivat Jennicin ohjelmiston päällä sovelluskerroksessa. Jotta ohjelmoija pääsisi muokkaamaan ohjelmistoa ja lisäämään sinne ICDNET-hankkeessa kehitettyjä paikannusalgoritmeja, tarvitaan Jenniciltä TOF-API ja siihen kuuluvat funktiokirjastot sekä lähdekoodi.



KUVA 14. Kaavio Jennic 5148:n ohjelmiston arkkitehtuurista

### 6.1.1 Tärkeimmät funktiot

Jennicin ohjelmistossa valmiina monia funktioita, joita käytetään verkon muodostamiseen, TOF-mittausten käynnistämiseen ja lopettamiseen, sekä laitteiden ja verkon alustamiseen. Tässä esitellään tärkeimmät funktiot ja niiden toiminta lyhyesti. (7, s. 20–23.)

**config.h:** Määritellään PANID, koordinaattorin osoite, päätelaitteen aloitusosoite, suurin laitteiden määrä, taajuuskanavien skannaus ja hiljaisten kanavien skannausaika.

**AppColdStart:** Laitteen käynnistys.

**vAppApiTofInit:** Käynnistää TOF-mekanismia.

**bAppApiGetTof:** Määrittelee, mistä laitteesta, mihin suuntaan ja kuinka monta TOF-lukemaa luetaan.

**s32AppApiTofGetCalloffset:** Noutaa kalibrointivakion pikosekuntein.

**vAppApiTofSetCalloffset:** Asettaa kalibrointivakion pikosekuntein.

### 6.1.2 Laitteohjelmistojen variantit

Koska järjestelmässä on laitteita, joilla on erilaisia tehtäviä, täytyy ohjelmasta tehdä erilaisia variantteja eri laitteille tarpeen mukaan. Alla on esitetty tarvittavat ohjelmavariantit.

- **1. isanta.c** : koordinaattorilaitte, joka muodostaa verkon ja siirtää koordinaatit PC:lle. Toimii myös yhtenä ankkureista. Koordinaatit voidaan vaihtoehtoisesti tulostaa LCD-näytölle.

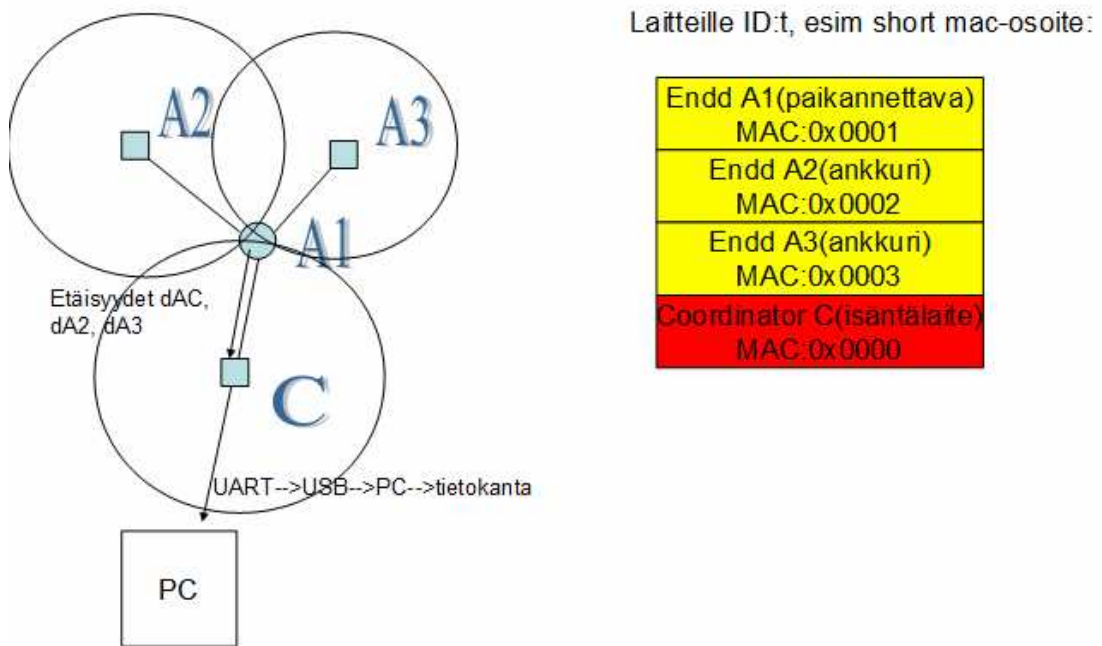
- **2. a1endd.c:** Paikannettava laite, joka laskee koordinaattinsa ja lähettää koordinaatit isännälle.
- **3. a2endd.c ja a3endd.c:** Ankkurilaitteet, jotka ovat paikallaan ja joiden paikat tiedetään.

## 6.2 TOF-sovellus

Signaalin kulkuaikaan perustuva paikannusjärjestelmä tehdään IEEE 802.15.4 -standardin pohjalle ilman ZigBee-verkkokerrosta. Tällöin paikannettava tagi voidaan konfiguroida lähettämään TOF-paketteja kaikille verkossa oleville laitteille samanaikaisesti. Ankkurilaitteen sovellus lähettää vastauksen jalkapalloilijan tagiin osoitteen kera. Jalkapalloilijan tagi pystyy näin ollen erottelmaan eri ankkureiden TOF-paketit lyhyen MAC-osoitteen perusteella. Kun vastaukseen lisätään myös signaalin voimakkuus, voidaan käytettävät ankkurit valita järkevästi jättämällä pois kauimmaisets ankkurit. Koska paikannusjärjestelmä tuottaa suuren määrän dataa, on tärkeää pyrkiä minimoimaan siirrettävän datan määrä ja välttää turhaa datan siirtoa. (7, s. 17.)

Järjestelmässä on kolme kiinteää ankkurilaitetta (C, A2, A3), joiden paikat ovat tiedossa. Lisäksi järjestelmään kuuluu n kappaletta paikannettavia laitteita (tässä nimetty A1), kuten kuva 15 kertoo. Yksi ankkureista on isäntälaitte (C), joka siirtää paikkatiedot Jennicin UART-väylää käyttäen PC:lle tietokantaan. PC-sovelluksessa paikkatiedot voidaan liittää esimerkiksi pelikentälle tai pohjapiirrokseen ja tallentaa pelin tiedot.

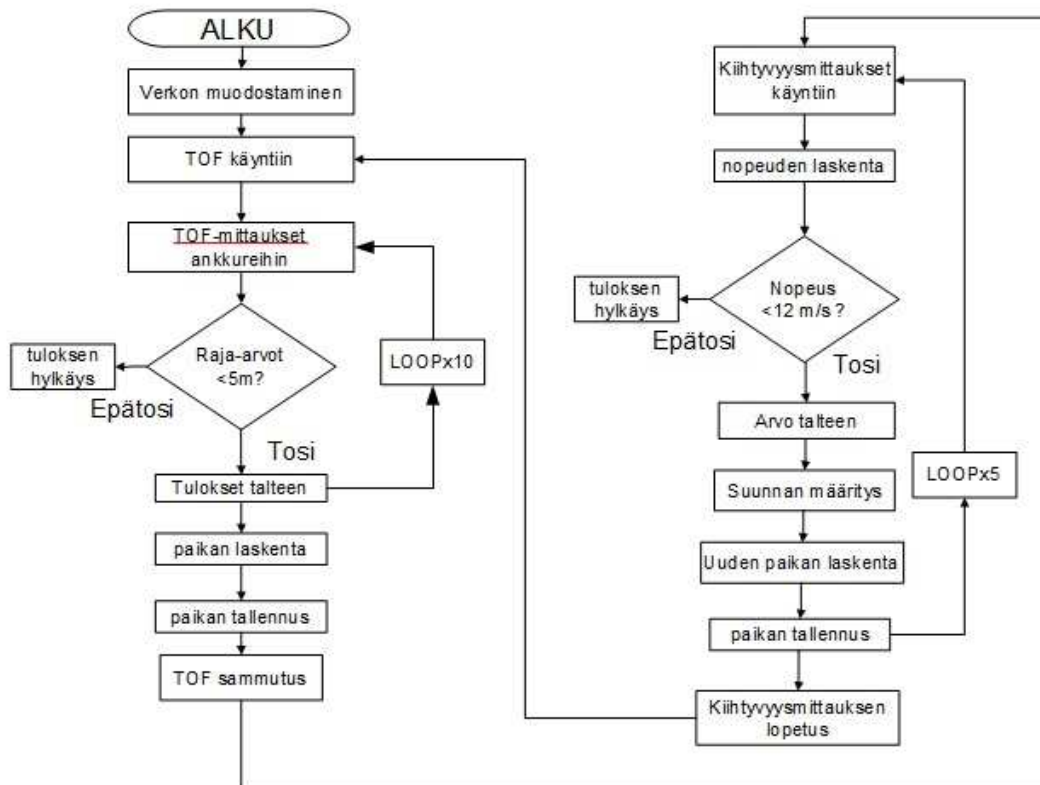
Laitteet tunnistetaan niiden lyhyessä muodossa olevien MAC-osoitteiden perusteella (Short address). Liikkuva laite (A1) mittaa etäisyydet ankkuripisteisiin FWD- ja REV-suuntiin vähintään kymmenen kertaa. Koordinaatit laskeaan etäisyyksien keskiarvoista trilateraatiokaavalla (kaava 1).



KUVA 15. Paikannusjärjestelmän rakenne

### 6.3 Tietojen yhdistäminen

Paikannusjärjestelmän täytyy kyetä vastaamaan kolmeen peruskysymykseen: missä kohde on, minne se on menossa ja millä nopeudella. Jotta paikannusjärjestelmä toimisi mahdollisimman tarkasti, riittävän nopeasti ja vähällä energialla, täytyy järjestelmän tuottamat paikkatiedot yhdistää järkevästi. Taulukkoon 4 on kerätty paikannusjärjestelmän tärkeimmät ominaisuudet TOF-paikannuksesta ja inertia-paikannuksesta. Järjestelmästä on piirretty vuokaavio rungoksi ohjelmiston kehitystä varten (kuva 16).



KUVA 16. Paikannusjärjestelmän vuokaavio

Ensimmäiseksi muodostetaan verkko laittamalla laitteet päälle. Kun kaikki laitteet ovat päällä, alkavat TOF-mittaukset radiopaikannusta varten. Tuloksia suodatetaan raja-arvomenetelmällä, joka on selitetty luvussa 7.1. Mittauksia tehdään 11 mittauksen paketeissa 10 kertaa. Kuhunkin ankkuriin tehdään siis yhteensä 110 mittausta, joista lasketaan keskiarvo paikan laskemista varten. Paikkatieto tallennetaan, TOF-mittaus lopetetaan ja aloitetaan kiihtyvyyshmittaukset. Kiihtyvyyshmittauksien perusteella lasketaan pelaajan nopeus. Tuloksista suodatetaan pois nopeudet, jotka ylittävät 12 m/s. Seuraavaksi lasketaan uusi paikka ja tallennetaan se. Tässä välissä voisi käyttää myös Kalman-suodatusta, jos mikrokontrollerin laskentateho riittää pitämään järjestelmän tarpeeksi nopeana. Inertiapaikannusta tehdään silmukassa peräkkäin viisi kertaa, jonka jälkeen palataan takaisin TOF-paikannukseen. Jalkapalloilijan tagi lähettää paikkatietonsa isäntäankkurille C aina paikan tallennuksen yhteydessä. Isäntälaitte C siirtää paikkatiedot

UART-USB-väylien kautta PC:lle tietokantaan. Paikannussilmukkaa tehdään, kunnes laitteet sammutetaan.

*TAULUKKO 4. Paikannusjärjestelmän ominaisuudet*

	<b>TOF</b>	<b>Inertia</b>	<b>Yhteensä</b>
<b>Mittausnopeus, max</b>	210 mittausta / sekunti	11 mittausta / sekunti	11 mittaus- ta / sekunti
<b>Tarkkuus</b>	2–3 metriä, hajonta suuri	0,50 metriä	0,5–1 metriä
<b>Max etäisyys ankkurista</b>	225 metriä	ei rajoitusta	225 metriä
<b>Virrankulutus</b>	18 mA	0,4 mA	18,4 mA
<b>Max laitteiden määrä verkossa</b>	50 laitetta	I <sup>2</sup> C-väylään jopa 1000 laitetta.	50 laitetta
<b>Paikannusnopeus, 3 ankkuria</b>	n. 70 paikannusta / sekunti	11 paikannusta / sekunti	11 paikannusta / sekunti
<b>Paikannusnopeus, 4 ankkuria</b>	n. 50 paikannusta / sekunti	11 paikannusta / sekunti	11 paikannusta / sekunti
<b>Paikannusnopeus, 10 ankkuria</b>	n. 20 paikannusta / sekunti	11 paikannusta / sekunti	11 paikannusta / sekunti

Lähtökohtana oli järjestelmä, jossa on minimimäärä laitteita. Kun järjestelmä saadaan toimivaksi minimivaatimuksilla, voidaan ankkurilaitteiden ja pelaajien määrää kasvattaa. Järjestelmän todellinen suorituskyky saadaan selville vasta laajojen testien avulla.



## 7 PAIKANNUKSEN TARKKUUDEN PARANTAMINEN

Paikannuksen tarkkuudella tarkoitetaan sitä, kuinka lähelle paikannettavan kohteen todellista sijaintia mittauksista lasketut paikannustulokset osuvat. Mitä lähemmäs todellista sijaintia paikannustulos osuu, sen tarkempi on tulos. Jalkapalloilijan paikannuksen tarkkuutta voidaan parantaa käsittelemällä mitattuja tietoja ennen varsinaista paikan laskentaa. Mitattua etäisyystietoa ja kiihtyvyydestietoja kannattaa suodattaa jo ennen koordinaattien laskemista, jotta käsiteltävän tiedon määrä pysyy mahdollisimman pienenä. Toisaalta järjestelmän nopeus säilyy parempana, kun ei lasketa paikkaa epärelevanttien mittaustulosten perusteella.

### 7.1 Raja-arvot mittaustuloksille

TOF-etäisyysmittauksissa esiintyy jonkin verran virheellisiä tuloksia, jotka poikkeavat selvästi muista mittaustuloksista. Mittaustulosten käsittelyn ensimmäinen vaihe on tulosten suodattaminen. Yksittäisen ankkurin tuloksille lasketaan muuttuva keskiarvo edellisistä  $n$  määrän etäisyyksistä kaavan 5 mukaisesti. (1, s. 19.)

$$d_{average} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_k$$

KAAVA 5.

Uusia etäisyysarvoja  $d_{n+1}$  verrataan arvoon  $d_{average}$ . Jos arvojen ero on suurempi kuin määritetty etäisyyden kynnyсарво  $d_{threshold}$ , uusi etäisyysarvo hylätään. Muuten se lisätään käytettäväksi  $d_{average}$ -kaavaan. (1, s. 19)

Kiihtyvyyssmittauksissa sopiva raja-arvo kannattaa asettaa nopeudelle. Tällöin virheellinen mittaaminen voidaan hylätä jo ennen paikan laskentaa. Tällöin

säästytään turhalta laskennalta. Nopeuden raja-arvoksi asetetaan 12,2 m/s, joka on tähän mennessä suurin ihmisen saavuttama juoksunopeus.

## **7.2 Keskiarvoistus**

Järjestelmän nopeuden sallimissa rajoissa tehty mittaustulosten keskiarvoistaminen pienentää osaltaan paikannusvirhettä. Mitä enemmän mittaustuloksia, sitä tarkempi mittaustulos. Jennicin liikkuva tagi tekee noin 210 TOF-mittausta sekunnissa. Kolmen ankkurin järjestelmässä, mikä on minimivaahtimus paikannukselle, voidaan siis tehdä 66 mittausta sekunnissa ankkuria kohti. Jos ankkureita on enemmän, mittauksia voidaan ottaa vähemmän.

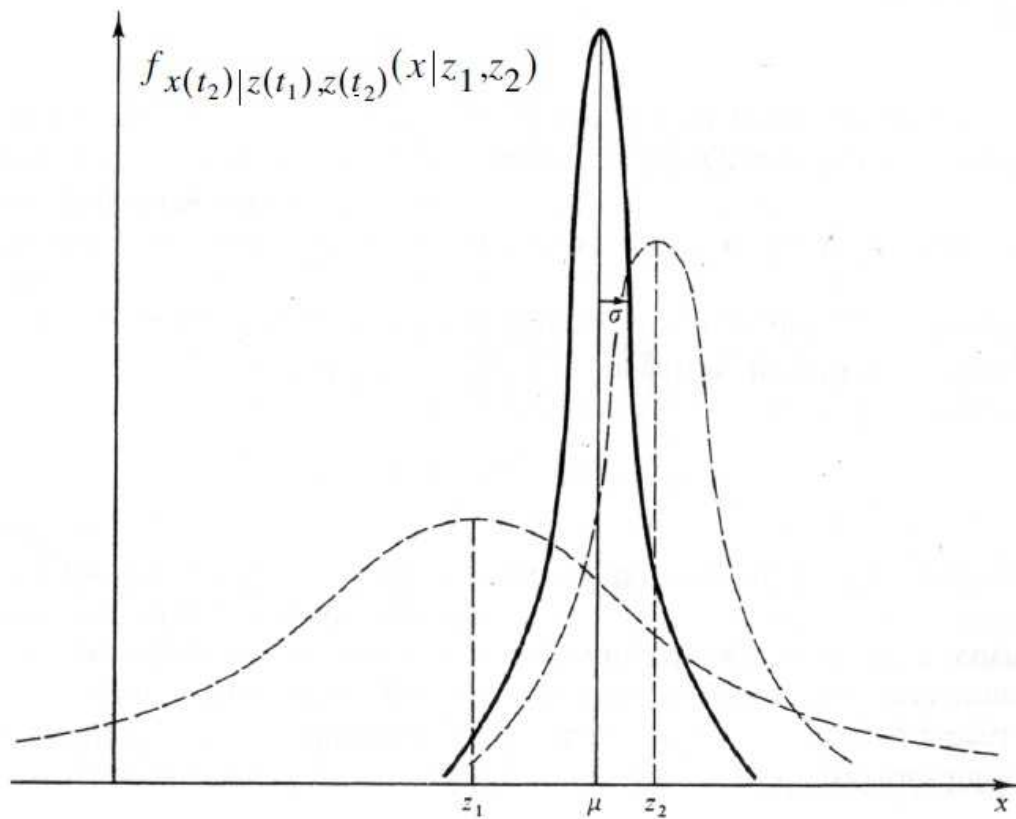
## **7.2 Kalman-suodatus**

Kalman-suodatus käsittää joukon matemaattisia yhtälöitä, joita käyttämällä voidaan laskennallisesti arvioida prosessin tilaa tavalla, joka minimoi neliöllisen virheen. Suodatus tukee menneen, nykyisyyden ja jopa tulevaisuuden tilat, vaikka mallinnettava järjestelmä olisi tuntematon. Tässä työssä keskitytään tutkimaan, miten Kalman-suodatus on hyödyksi paikannusjärjestelmässä. Tärkeimmät Kalman-suodatuksessa käytettävät kaavat on johdettu Marko Helenin diplomityössä, joten en pureudu kaavojen johtamiseen sen syvemmälle. (16; 17, s. 33–37.)

Kalman-suodattimella on varsin merkittävä asema säätötekniisten ongelmien ratkaisemisessa ja sitä käytetäänkin lukuisissa erilaisissa sovelluksissa. Se soveltuu erittäin hyvin myös sensorifuusioon eli useista eri paikoista saapuvien mittaustietojen yhdistämiseen siten, että todellinen ilmiö kuvautuu mahdollisimman totuuden mukaiseksi. Paikannusjärjestelmään saadaan mittaus-tietoa useasta eri lähteestä, kuten TOF-mittauksista, RSSI-mittauksista ja kiihtyvyysanturilta. Käytettäviä parametreja ovat TOF-mittauksella selvitetty paikka ja nopeus sekä kiihtyvyysanturilta saatu kiihtyvyys ja nopeus.

Kalman-suodatinta käyttämällä saadaan parannettua järjestelmän tarkkuutta. Kun eri järjestelmien tiedot yhdistetään, voidaan samalla parantaa tarkkuutta. Yhdistettyjen paikkatietojen tarkkuus paranee ja datan kohina väheenee, kuten kuvassa 17, missä  $z_1$  = datajakauma lähteestä 1,  $z_2$  = datajakauma lähteestä 2 ja  $\mu$  = yhdistetty data. (18, s. 11.)

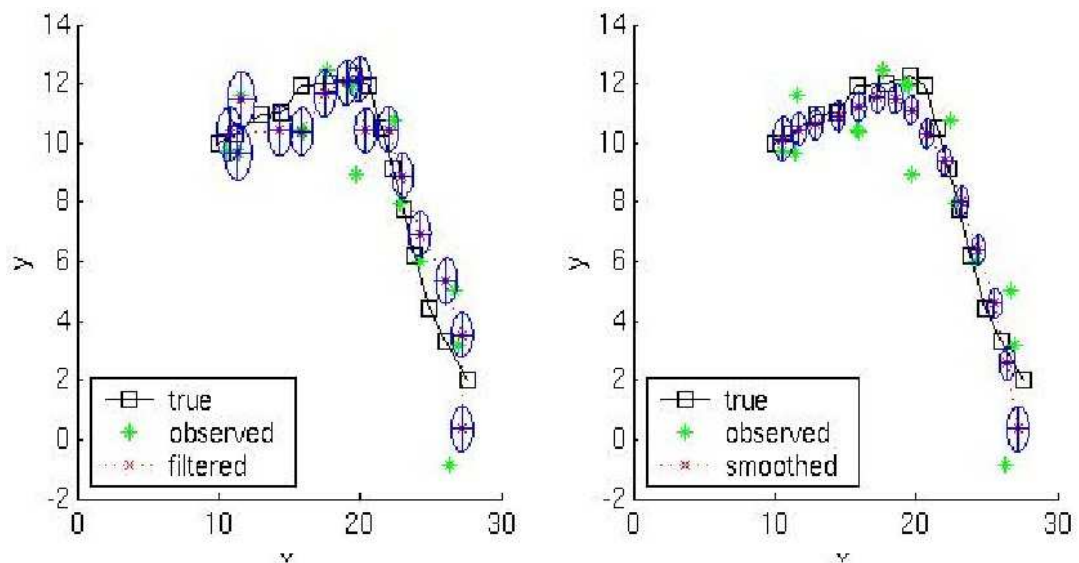
Jalkapalloilijan paikannuksessa irrallisen datan lineaarisessa suodatuksessa ongelmana on pelaajan summittainen liike. Kalman-suodatuksessa on mahdollista jäljittää sijainti ja pelaajan nopeus ja täten alentaa paikannuksen virhettä.



KUVA 17. Kalman suodattimella yhdistettyä dataa (18, s. 11)

Kiihtyvyyssanturin laskemista paikannuspisteistä saadaan laskettua jalkapalloilijalle eräänlainen keskiarvoistettu paikannuspolku Kalman Smoothing-menetelmän avulla, kun saadaan selville tulosten keskiarvo ja varianssi.

Matlabille on saatavissa Kalman filtering toolbox -paketti, jolla Kalman suodatusta ja Kalman Smoothing -menetelmiä voi mallintaa matemaattisesti tietokoneen avulla, kuten kuvassa 18 on tehty. Kalman Smoothing -laskennan jälkeen polku on lähempänä todellista tilannetta. (19, s. 3–4; 20.)



*KUVA 18. Paikannuspolun piirtäminen Kalman Smoothing -menetelmää käyttämällä (20)*

## 8 YHTEENVETO

Työssä suunniteltiin WSN-paikannusjärjestelmä, jolla paikannetaan jalkapalloilijaa pelikentällä. Paikannustekniikoiksi valittiin TOF-radiopaikannus ja inerttiapaikannus. Järjestelmän laitteistona käytettiin Jennic Ltd:n JN5148 Evaluation Kit -kehitysympäristöä sekä Freescale MMA7455 -kiihtyvyysanturia. Radioverkkotekniikaksi valittiin WSN-verkkoja varten kehitetty IEEE 802.15.4 -standardi. WSN-verkko muodostuu, kun samalla PAN ID:llä alustetut laitteet laitetaan päälle. Laitteet tunnistetaan MAC-osoitteiden perusteella. Jennicin laitteistoon saatiin laitevalmistajalta ohjelmistopaketti, jonka avulla voidaan mitata etäisyyksiä radiosignaalin kulkuaikaan ja radiosignaalin vapaan tilan vaimennuksen perusteella. Jennicillä ei ollut valmiina radiopaikannussovellusta, joten radiopaikannusjärjestelmä kehitettiin itse.

Työssä käytettävä TOF-radiopaikannus perustuu trilateraatiolaskentaan. Siinä on vähintään kolme kiinteää ankkurilaitetta, joiden paikat tiedetään. Paikannettava laite, tässä tapauksessa jalkapalloilija, liikkuu pelikentällä radiokantaman ulottuvissa. Jalkapalloilijan tagi mittaa TOF-menetelmällä jatkuvasti etäisyyksiä ankkuripisteisiin ja laskee etäisyyksien perusteella paikkansa trilateraatiomenetelmällä.

Järjestelmän suunnittelussa käytettiin apuna Jennic 5148 -kehityspaketilla tehtyjä laajojen TOF-etäisyysmittausten tuloksia sekä ICDNET-hankkeessa tehtyjä kiihtyvyysanturimittausten tuloksia. Etäisyysmittausten tulokset osoittivat, että mittaustuloksissa on suurta hajontaa. Suodattamattomilla mittaustuloksilla paikannus ei ole järkevää. Täten mittaustuloksia muokataan ennen paikan laskemista asettamalla raja-arvot hyväksyttävälle tuloksille, keskiarvoistamalla sekä Kalman-suodatuksella.

Myös kiihtyvyysanturin tuloksia muokataan suodattamalla pois yli 12,2 m/s:n nopeudet ennen paikan laskentaa. Kiihtyvyysanturin tuottamia paikannuspisteitä käsitellään Kalman Smoothing -tekniikalla, joka piirtää paikannuspolun. Kiihtyvyysanturi radiotageineen kiinnitetään jalkapalloilijan yläselkään, jolloin

kiihtyvyysanturi pysyy mahdollisimman paljon samassa asennossa pelikenttään nähden. Tämä vähentää suuntavirhettä, joka syntyy, jos kiihtyvyysanturi kääntyy jatkuvasti pelikentän tason suhteen.

Radiohäiriöt ovat 2,45 GHz:n ISM-kaistalla suuri haaste järjestelmän sujuvan toiminnan kannalta. Radiohäiriöitä vastaan taistellaan valitsemalla käyttöön kanava, jolla on vähiten liikennettä, sekä pitämällä oman järjestelmän radio-liikenne mahdollisimman pienenä. Sijoittamalla radioankkurit 20 metrin päähän kentän laidoista noin 10 metrin korkeudelle saavutetaan paras mittaus-tarkkuus sekä parempi LOS-radioyhteys.

Paikannusjärjestelmään suunniteltiin paikkatietojen yhdistämismenetelmä. Alkukoordinaatit otetaan TOF-paikannuksella. Tämän jälkeen menetelmässä käytetään vuorotellen kiihtyvyysanturin ja TOF-paikannuksen paikkatietoja siten, että kiihtyvyysanturin paikkatiedot luetaan viisi kertaa, jonka jälkeen paikkatiedot otetaan TOF-paikannuksesta. Kiihtyvyysanturin käytön myötä radioyhteyden tarve vähenee, mikä parantaa paikannusjärjestelmän energia-tehokkuutta ja radiohäiriöiden sietoa.

Jalkapalloilijan paikannustiedot lähetetään yhden isäntälaitteena toimivan ankkurilaitteen kautta PC:lle. Tietokoneella paikkatiedot voidaan tallentaa ja paikkatiedoista voidaan muodostaa kokonaiskuva.

Työn tavoitteena ollut jalkapalloilijan paikannus pelikentällä voidaan toteuttaa Jennic 5148 -laitteistolla. Pieni virrankulutus mahdollistaa jopa 40 tunnin yhtämittaisen TOF-paikannuksen kahdella AA-paristolla. Mittaustietojen käsittely ja suodatus on kuitenkin tarpeen suurten varianssien takia. Järjestelmä kykenee vastaamaan paikannuksen peruskysymyksiin missä paikannettava laite on, minne se on menossa ja kuinka nopeasti.

## 9 POHDINTA

Työn alkaessa tietoni sensoriverkoista ja radiopaikannuksesta olivat perustasolla. Myös Jennicin laitteisto oli ennestään tuntematon. Työn aihe vaikutti kuitenkin mielenkiintoiselta ja haastavalta, joten päätin tarttua haasteeseen.

Alun perin oli tarkoitus kehittää ja toteuttaa koko paikannusjärjestelmä itse. Työn edetessä ja asioihin perehtyessä kävi kuitenkin ilmi, että työmäärä olisi liian iso ja työstä tulisi liian laaja, jos pitäisi mennä toteutukseen asti. Laittevalmistajalla ei ollut valmiina TOF-tekniikkaan perustuvaa paikannusjärjestelmää. Ainoastaan TOF-tekniikkaan perustuva etäisyysmittaus oli saatavissa. Ohjelmiston kehittäminen päätettiin jättää pois ja päätettiin tyytyä paikannusjärjestelmän suunnittelemiseen, mikä oli erittäin hyvä ratkaisu valmistumiseni kannalta. Varsinainen järjestelmäsuunnittelu ja laitteistoon tutustuminen käynnistyi, kun saimme laitevalmistajalta tarvittavat API:t ja lähdekoodit TOF-sovellukseen.

Järjestelmäsuunnittelu osoittautui haastavaksi, mutta mielenkiintoiseksi tehtäväksi. Laitteiston ja tekniikoiden tuntemusta täytyy löytyä laajalta alueelta. Mitä enemmän tietoa löytyy, sen parempi. Toisaalta kokonaisuuden hallitseminen vaikeutuu, kun tietoa on paljon saatavilla. Työtä suoritettaessa opin paljon WSN-tekniikoista, paikannuksesta, järjestelmäsuunnittelusta, dokumentoinnista ja eri tekniikoiden yhdistämisestä. Ymmärrys laitekokonaisuuksista, laitteiden ohjelmoinnista, käyttöönnotosta ja teknologioiden soveltamisesta on kasvanut. Opin myös, että järjestelmäsuunnittelussa on tärkeää osata tehdä optimaalisia kompromisseja eri teknisten ominaisuuksien kesken. Jonkin ominaisuuden parantaminen yleensä heikentää jotakin toista tärkeää ominaisuutta. Esimerkiksi lähetystehon kasvattaminen parantaa radiokantamaa, mutta kasvattaa virrankulutusta. Lisäksi ylitehoinen lähetys häiritsee muita verkossa olevia laitteita turhaan. Pitää kyetä löytämään hyvä kultainen keskitie ja pitämään järjestelmä mahdollisimman yksinkertaisena ja suoraviivaisena. Tällöin myös järjestelmän eteenpäin kehittäminen on vattomampaa ja nopeampaa.

Tässä työssä suunnitellun jalkapalloilijan paikannusjärjestelmän seuraava kehitysvaihe on ohjelmiston toteutus, jotta laitteisto saadaan testattavaksi ja edelleen kehitettäväksi. Paikannettavien pelaajien määrää voi kasvattaa siten, kun saadaan järjestelmä paikantamaan yksi pelaaja. Järjestelmää voisi kehittää edelleen lisäämällä siihen gyroskoopin tai elektronisen kompassin, jolloin saataisiin pidettyä kiihtyvyyssanturin koordinaatisto lähempänä ulkoisen tarkkailijan koordinaatistoa. Lisäksi saataisiin arvokasta tietoa valmennukseen esimerkiksi pelaajan kyvystä nopeisiin suunnanmuutoksiin. Myös pelkät kiihtyvyystiedot voisi ottaa talteen jälkipelejä ja valmennusta varten.

Tulevaisuudessa WSN-pohjaiset järjestelmät ovat joustavampia, monipuolisempia, älykkäämpiä ja helppokäyttöisempiä kuin entiset. Yhdelle piirille integroidaan yhä enemmän toimintoja. Käyttäjä voi helposti valita, mitä hän haluaa laitteistolla tehdä. Sensoriverkkoja voi käyttää kodin automaatioon ja turvasovelluksiin, ja siitä voi kehittää sovelluksia urheiluvalmennukseen ja tulosten seurantaan. Maataloudessa WSN-tekniikkaa voisi käyttää peltojen ja kasvihuoneiden tarkkaan monitorointiin sekä työkoneiden ja karjan seurantaan. Satama-alueilla ja teollisuudessa WSN-pohjaista paikannusta voi käyttää tavaravirtojen ja työkoneiden seuraamiseen. Vauhdikkaan pojantaaperon isänä minulle heräsi ajatus myös sovelluksesta lastenhoidon avuksi. Paikannusjärjestelmä voisi toimia myös taaperoikäisten lasten valvonnan apuna. Jennic 5148 -mikrokontrollerissa olevaa audioulostuloa voisi käyttää hyödyksi hälytysäänien tuottamiseen, kun lapsi karkaa liian kauas. WSN-pohjaisia sovelluksia on kehitetty jo moneen kohteeseen. Lisäksi kekseliäät ihmiset kehittävät jatkuvasti uusia sovelluksia.



## LÄHTEET

1. Bräysy, Vinski – Hurme, Jarkko – Rontu, Jari-Pekka – Teppo, Hannu 2010. Poster Abstract: Path Tracing Application and Algorithm for Wireless Sensor Network. Teoksessa EWSN 2010 7th European Conference on Wireless Sensor Networks, Posters and Demos, University of Coimbra.
2. IEEE 802.15 TG4 features. 2010. IEEE-standardi. Saatavissa: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>. Hakupäivä 31.8.2010.
3. JN-UG-3062-JN5148-EK010-User-Guide\_1v2. 2010. Datalehti. Saatavissa: <http://www.jennic.com>. Hakusana: JN-UG-3062-JN5148. Hakupäivä 30.6.2010.
4. Jennic IEEE 802.15.4 Wireless Networks User Guide JN-UG-3024. 2010. Datalehti. Saatavissa: <http://www.jennic.com>. Hakusana: JN-UG-3024. Hakupäivä 5.6.2010.
5. JN-DS-JN5148-1v4. 2010. Datalehti. Saatavissa: [http://www.jennic.com/files/product\\_briefs/JN-DS-JN5148-1v4.pdf](http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN-DS-JN5148-1v4.pdf). Hakupäivä 14.6.2010.
6. Savarese, C. – Rabaey, J.M. – Beutel, J. 2002. Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. Annual USENIX Technical Conference, Monterey, CA.
7. JN-UG-3068-Time-of-Flight-API. 2010. Datalehti. Saatavissa kysyttäessä: <http://www.jennic.com/support>. Hakupäivä 30.6.2010.
8. Freescale MMA7455L tekniset tiedot. 2007. Datalehti. Saatavissa: <http://www.farnell.com/datasheets/47838.pdf>. Hakupäivä 23.6.2010.

9. Freescale Ltd. 2007. Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers. Saatavissa:  
[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN3397.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3397.pdf). Hakupäivä 9.9.2010.
10. Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo – Öistämö, Juhani. 2005. Tekniikan kaavasto. 5. painos. Tampere: Tammertekniikka.
11. Liu, Hugh – Grantham, Pang. 1999. Accelerometer for Mobile Robot Positioning. Proceedings of the 1999 IEEE Industry Applications Society Conference Phoenix, Arizona, USA, October 3–7, 1999.
12. Sutinen, Jani 2010. Kiihtyvyyssanturin käyttö osana paikannusjärjestelmää. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Insinöörityö.
13. Savikoski, Teemu 2010. Etäisyyden mittaussignaalin kulkuaikaan perustuvalla menetelmällä WPAN-verkossa. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Insinöörityö.
14. Viinikainen, Ari 2003. Radiojärjestelmät 1. Kurssimateriaali, Jyväskylän yliopisto. Saatavissa: <http://users.jyu.fi/~arjuvi/opetus/tli347/tli245.pdf>. Hakupäivä 1.10.2010.
15. Juutilainen, Matti 2008. Radiotekniikan perusteet: signaalien eteneminen. Luentomateriaali. Saatavissa: <http://www2.it.lut.fi/kurssit/06-07/Ti5312600/luentokalvot/luento03.pdf>. Hakupäivä 24.9.2010.
16. Welch, G. & Bishop, G 2006. An Introduction to the Kalman Filter. Saatavissa: [http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman\\_intro.pdf](http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf). Hakupäivä 28.9.2010.
17. Helen, Marko 2001. Signaalinvoimakkuuteen perustuvan paikannusjärjestelmän tarkkuuden lisääminen kalibroinnin avulla. Tampere. Diplomityö.

18. Maybeck, Peter S. 1979. Stochastic Models, Estimation and Control.  
Saatavissa: [http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/maybeck\\_ch1.pdf](http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/maybeck_ch1.pdf).  
Hakupäivä 5.10.2010.
19. Yu, Byron M. – Shenoy, Krishna V. – Sahani, Maneesh 2004. Derivation  
of Kalman Filtering and Smoothing Equations. Saatavissa: [http://www-npl.stanford.edu/~byronyu/papers/derive\\_ks.pdf](http://www-npl.stanford.edu/~byronyu/papers/derive_ks.pdf). Hakupäivä 7.10.2010.
20. Kalman filter toolbox for Matlab. Saatavissa:  
<http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/Kalman/kalman.html>. Hakupäivä 7.10.2010.